

## 고출력 증폭기의 비선형 왜곡을 선형화하는 향상된 적응 사전 왜곡기에 대한 연구

권 오 상\*

### *Study on an Enhanced Adaptive Pre-distorter Linearizing Nonlinear Distortions of a High Power Amplifier*

Kwon, Oh Sang

#### 〈Abstract〉

A high power amplifier(HPA) has widely been used in wireless communications. In order to have a maximum power efficiency, the HPA uses a saturation domain having nonlinear characteristics, which generates nonlinear distortions to decrease the transmission efficiency. In order to solve this problem, various methods to linearize HPA have been reported until now, and the pre-distorter method is very attractive among them.

In this paper, a new enhanced adaptive pre-distorter method was proposed to be applied for compensating nonlinear distortions of HPA. Through computer simulations as well as the analytical analysis, it could be shown that it is possible for both conventional adaptive pre-distorter and proposed adaptive pre-distorter, to be applied for linearizing HPA. Also, the simulations results demonstrated that the proposed adaptive pre-distorter may have faster convergence speed and better capability of compensating the nonlinear distortion than the conventional adaptive pre-distorter with nearly equal computation complexity.

Key Words : Amplifier, Adaptive, Nonlinear Distortion, Linearize, Convergence Speed

### I. 서론

고 전력의 마이크로파 소자는 레이더와 통신 등에서 폭넓게 사용되고 있으며, 그 중 대표적인 것이 고출력 증폭기이다. 고출력 증폭기는 무선 통신 시스템에서 신호를 송신할 때 충분한 송신 전력을 얻기 위하여 사용되는데, 일반적으로 최대 출력의 전력을 얻기 위해서는 고출력 증폭기의 포화(saturation) 영역

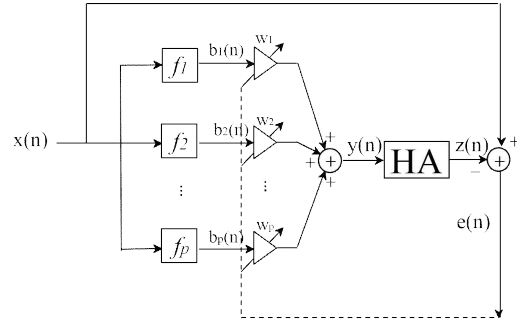
부근에서 동작하여야 한다. 하지만 이는 비선형 왜곡을 발생시켜 시스템의 성능을 크게 떨어지게 한다. 특히, 이러한 고출력 증폭기의 비선형 특성은 송신 신호의 진폭에 매우 큰 영향을 끼쳐 시스템의 성능을 좌우하므로 반드시 보상하여야 한다. 고출력 증폭기의 비선형 왜곡을 감소시키기 위하여 출력 신호를 선형 영역에서 동작시키는 방법이 있으나 고출력 증폭기의 효율과 출력을 감소시키므로 바람직하지 않은 방법이라고 할 수 있다. 따라서 고출력 증폭기의 효

\* 고려사이버대학교 전기전자공학과 교수

율을 높이고, 통신 시스템의 성능을 향상시키기 위해서 많은 연구가 이루어져 왔다. 그 동안 고출력 증폭기의 비선형성을 줄이기 위한 선형화 방법으로는 순방향(feed-forward) 방식[1], 역방향(feed-back) 방식[2], 그리고 사전왜곡(pre-distortion) 방법[3-4] 등이 있다. 하지만 최근에 가장 각광받는 방법은 사전처리(pre-processing) 또는 사전왜곡 방법으로서 송신기에 사전 처리기(pre-processor) 또는 사전 왜곡기(pre-distorter)를 사용하여 비선형 왜곡의 근원이 되는 고출력 증폭기를 쉽게 보상할 수 있다는 점에서 매우 효과적이라 할 수 있다. 일반적으로 사전 왜곡기는 고출력 증폭기의 전단에 위치하며, 고출력 증폭기에 의해 발생하는 신호의 비선형 왜곡만큼 미리 보상하는 방향으로 신호를 미리 왜곡하여 고출력 증폭기로 보냄으로써 사전왜곡기와 고출력 증폭기를 결합한 전체 시스템을 선형 시스템으로 만들게 된다. 즉, 고출력 증폭기의 비선형 시스템 특성을 사전 왜곡기를 이용하여 역모델링(inverse modeling)한다고 할 수 있다. 따라서 사전 왜곡기와 고출력 증폭기를 통과한 송신 신호는 선형적인 특성을 갖게 된다. 현재까지 이를 기반으로 한 다양한 연구가 진행되어 왔으나, 복잡한 회로를 필요로 하며, 알고리즘이 복잡하여 실제로 구현하는데 있어서 어려움이 많다[5-7].

따라서 본 논문에서는 비선형 시스템에서 널리 사용되는 Volterra 필터를 사용하여 사전 왜곡기를 구성하고, Volterra 필터를 구동하는 알고리즘으로서 양방향 제어 알고리즘을 새롭게 제안한다. 고출력 증폭기로서는 무선 시스템에서 많이 사용되는 진행파관(Travelling Wave Tube, TWT)을 선택하여 진행파관의 비선형 왜곡을 보상하였다. 진행파관은 1943년에 발명된 이래 진행파관의 증폭 원리가 증명되었고, 빔파형 간의 선형성과 비선형성에 대한 이론 등이 잘 정립되어 있다[8].

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서 고출력 증폭

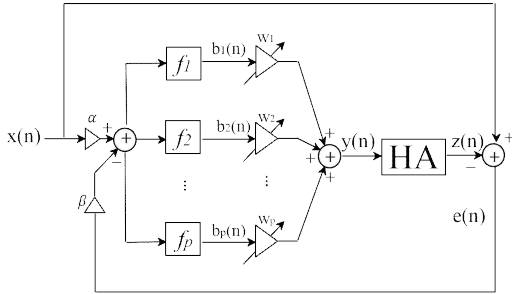


<그림 1> 기존의 적응 Volterra 사전 왜곡기의 구조

기의 비선형 왜곡을 보상하기 위하여 제안한 양방향 제어 알고리즘을 적용한 양방향 적응 Volterra 필터에 대하여 논하고, III장에서는 제안한 양방향 적응 Volterra 필터의 성능을 모의실험을 통해 증명하였고, IV장에서 결론을 맺었다.

## II. 제안된 적응 사전 왜곡기

일반적으로 사전 처리기 또는 사전 왜곡기를 사용하여 비선형 왜곡을 선형화하는 전체적인 구조는 그림 1과 같다[9]. 그림에서 사전 왜곡기는 널리 알려진 Volterra 필터를 많이 사용하는데, 메모리가 없는 적응 Volterra 사전 처리기 또는 적응 Volterra 사전 왜곡기  $W(n)$ 이 비선형 왜곡을 발생시키는 고출력 증폭기  $HA$  전단에 위치한다. 여기서  $HA$ 가 메모리가 없는 비선형 함수의 선형적인 결합으로 모델링이 된다면 앞단에 위치한 적응 Volterra 필터를 이용하여 역모델링을 하는 것이 가능하다. 즉, 원래의 송신 신호  $x(n)$ 은 Volterra 필터와 고출력 증폭기를 통과하여 선형적으로 증폭되며, 비선형 왜곡을 추적하여 감소시키는 적응 알고리즘으로서 오차 신호  $e(n)$ 의 제곱 평균을 최소화하도록 구동되는 최소 평균 제곱(least mean square, LMS) 알고리즘이 대표적으로 사용된다.



<그림 2> 제안한 적응 Volterra 사전 왜곡기의 구조

LMS 알고리즘은 구현이 간단하고 안정적이며, 수학적으로도 해석이 용이하여 널리 사용되어 왔지만 전반적으로 수렴속도가 느리고 참조신호를 필요로 하며, 잔여 에너지가 증가하여 제어기가 불안정하게 된다.

따라서 본 논문에서는 계산 양의 증가가 거의 없으면서도 적응 사전 왜곡기의 수렴 속도를 향상시킨 새로운 알고리즘을 제안한다. 이 알고리즘은 역방향 제어 알고리즘의 궤환 오차신호를 순방향 제어 알고리즘의 참조신호와 결합한 양방향 (Bi-directional) 알고리즘으로 구성된다. 역방향 제어 알고리즘은 순방향 제어 알고리즘의 단점인 느린 수렴속도를 향상시키거나 상관도가 있는 참조신호를 얻을 수 없을 때 사용한다. 하지만 역방향 제어 알고리즘은 주어진 대역폭에서 제한적인 이득을 얻을 수 있는 이득-대역폭 제한의 단점과 제어기가 불안정하다는 단점이 있다. 이 문제는 전체적인 구조를 순방향 제어 알고리즘의 형식을 따르게 하여 안정적인 알고리즘으로 해결할 수 있다. 또한, 계산 양 측면에서 기존의 알고리즘에 비해 덧셈과 곱셈이 한번 필요할 뿐 많은 계산 양의 증가가 없고, 가중도 파라미터  $\alpha$ 와  $\beta$ 의 값에 따라 순방향 제어 알고리즘과 역방향 제어 알고리즘의 특성으로 구현이 가능하다는 장점이 있다. [10-11]

본 논문에서 제안하는 새로운 적응 Volterra 사전 왜곡기의 구조는 그림 2와 같다. 이때, 적응 Volterra 사전 왜곡기는 비선형 함수의 선형적인 결합으로 구

성되므로 입력과 출력과의 관계는 다음의 (1)식과 같이 주어진다.

$$y(n) = \sum_{i=1}^P w_i f_i [x(n)] \quad (1)$$

여기서  $P$ 는 사용된 함수의 개수이며,  $f_i$  ( $i=1, 2, \dots, P$ )는 비선형 함수를 나타낸다. 비선형 함수의 출력과 적응 보정기의 계수는 다음의 (2)식부터 (4)식과 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{B}(n) = [b_1(n), b_2(n), \dots, b_P(n)]^T \quad (2)$$

여기서

$$b_m(n) = f_m[\alpha x(n) - \beta e(n)], \quad m = 1, 2, \dots, P \quad (3)$$

$$\mathbf{W}(n) = [w_1(n), w_2(n), \dots, w_P(n)]^T \quad (4)$$

또한, 적응 보정기와 비선형 시스템 HA의 출력은 다음의 (5)식과 (6)식으로 각각 표현할 수 있다.

$$y(n) = \mathbf{W}^T(n)\mathbf{B}(n) \quad (5)$$

$$z(n) = H[\mathbf{W}^T(n)\mathbf{B}(n)] \quad (6)$$

오차신호  $e(n)$ 은 다음의 (7)식과 같이 출력신호  $z(n)$ 와 입력신호  $x(n)$ 의 차로 정의할 수 있다.

$$e(n) = x(n) - z(n) \quad (7)$$

적응 보정기의 최적의 계수 값은 위의 오차신호 분산을 최소화함으로써 구할 수 있다.

$$\frac{\partial E[e^2(n)]}{\partial \mathbf{W}(n)} = \mathbf{0} \quad (8)$$

$$E[H'[\mathbf{W}^T(n)\mathbf{B}(n)]\mathbf{B}(n)][x(n) - H[\mathbf{W}^T(n)\mathbf{B}(n)]] = \mathbf{0} \quad (9)$$

위의 (9)식에서 비선형 함수 H의 통계적 특성과 정

보를 완전하게 알고 있다면, 비선형 방정식을 풀 수 있지만 일반적으로는 그렇지 않다. 따라서 입력 데이터에 대하여 다음의 (10)식과 같이 통계적 기울기 알고리즘을 사용하는 것이 효과적이다[12].

$$\mathbf{W}(n+1) = \mathbf{W}(n) - \mu \nabla_{\mathbf{n}} \quad (10)$$

여기서  $\mu$ 는 수렴과 안정성을 결정하는 양의 상수이며,  $\nabla_{\mathbf{n}}$ 은 기울기 벡터의 추정된 값이며, 다음의 (11)식과 같이 정의된다.

$$\nabla_{\mathbf{n}} = \frac{\partial e^2(n)}{\partial \mathbf{W}(n)} = -H'[\mathbf{W}^T(n)\mathbf{B}(n)]e(n)\mathbf{B}(n) \quad (11)$$

위의 (10)식에서 (11)식으로부터 계수에 대한 보정식이 다음의 (12)식과 같이 만들어진다.

$$\mathbf{W}(n+1) = \mathbf{W}(n) + \mu H'[\mathbf{W}^T(n)\mathbf{B}(n)]\mathbf{B}(n)e(n) \quad (12)$$

여기서  $H'$ 은 비선형 함수  $H$ 의 미분 값이며, 계산을 통하여 최적의 값을 추정하는 것은 어렵다. 따라서 다음의 경우를 가정하여 추정한다. 만약에 다음의 (13)식과 같이 비선형 함수의 기울기 함수  $H'$ 이 입력의 크기 범위  $(a, b)$ 에서 항상 양이라면

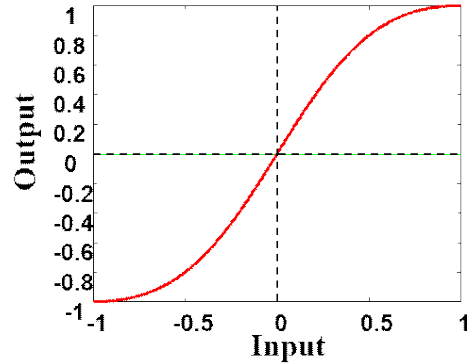
$$H'[y] > 0, \quad a < y < b, \quad (13)$$

위의 (11)식에서 알 수 있듯이 기울기 방향이  $\mathbf{B}(n)e(n)$ 에 의해 결정되며,  $\mu'$ 으로  $\mu H'$ 을 대체한다면 다음의 (14)식이 만들어진다.

$$\mathbf{W}'(n+1) = \mathbf{W}'(n) + \mu' \mathbf{B}(n)e'(n) \quad (14)$$

여기서  $e'(n)$ 은  $\mathbf{W}'(n)$ 에 의해 생기는 오차이다. 위

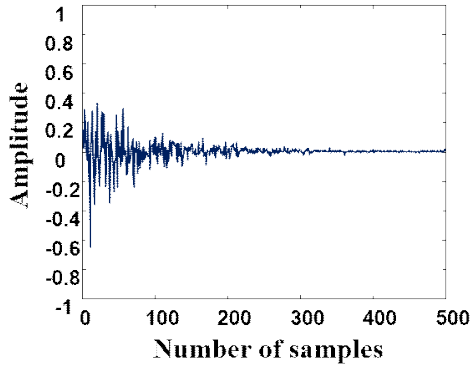
의 (14)식에서 함수  $H'$ 은 사용되지 않으며, 비선형 함수  $H$ 를 추정할 필요도 없으므로 필터 계수에 대한 보상식은 기존의 LMS 알고리즘의 보상식과 동일하다. 실제적으로 (13)식의 조건은 포화 특성을 가진 비선형 소자와 같은 많은 비선형 시스템에서 만족되므로 (14)식의 간소화된 보상식을 사용하여 비선형 시스템을 선형화하는데 사용할 수 있다.



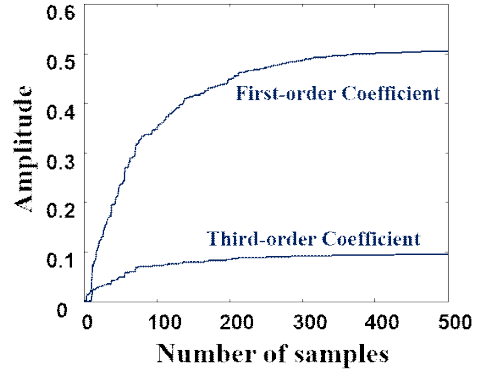
<그림 3> 진행파관의 입력과 출력 특성

### III. 모의 실험

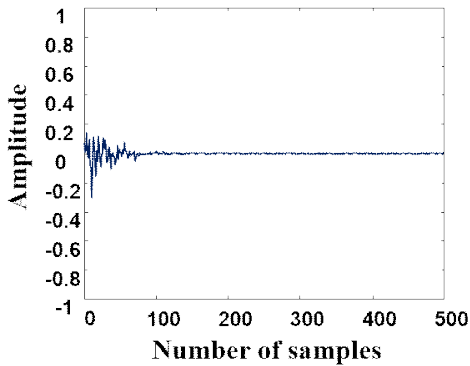
모의 실험을 위한 고출력 증폭기로서 무선 통신 시스템에서 널리 사용되는 진행파관을 선택하였다. 진행파관은 포화 특성을 가지며, 비선형 왜곡을 발생시키는 비선형 소자이다. 따라서 진행파관의 응답이 비선형 왜곡을 발생시키는 시스템  $HA$ 로 사용되며, 제안된 적응 Volterra 사전 왜곡기는 그림 2와 같이 사전 처리기로 동작하여 진행파관의 비선형 왜곡을 선형화하게 된다. 진행파관 모델의 입력과 출력 관계식은 다음의 (15)식과 같이 정의되며, 그 응답을 그림 3과 같이 나타낼 수 있다.



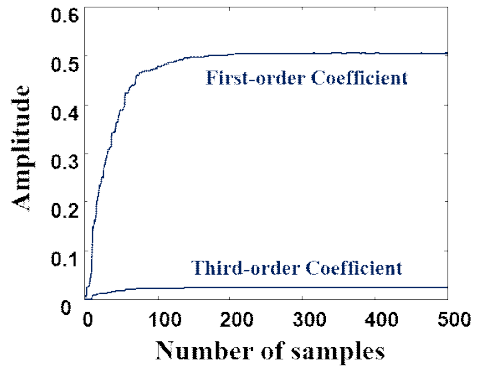
(a)



(a)



(b)



(b)

<그림 4> 적응 사전 왜곡기의 평균 표본 오차 신호  
(a) 기존의 사전 왜곡기  
(b) 제안된 사전 왜곡기

<그림 5> 적응 사전 왜곡기의 계수 궤적  
(a) 기존의 사전 왜곡기  
(b) 제안된 사전 왜곡기

$$H(y) = \frac{2y}{1+y^2} \quad (15)$$

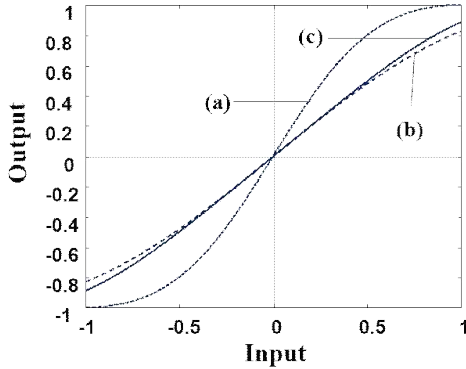
여기서 위의 (15)식과 같이 진행과관의 입력과 출력 특성은 기함수의 특성을 가지므로 비선형 왜곡을 보상하기 위한 적응 사전 왜곡기는 아래의 (16)식과 같이 기함수들로 구성된 테일러(Taylor) 함수를 사용할 수 있다.

$$y(n) \doteq w_1(n)x(n) + w_2(n)x^3(n) \quad (16)$$

입력신호로서는 아래의 (17)식과 같이 균일하게 분포된 임의(Random) 신호를 사용하였다.

$$p(x) = \frac{1}{2}, \quad -1 < x < 1 \quad (17)$$

성능 비교를 위해 기존의 LMS 알고리즘을 사용하는 적응 사전 왜곡기와 제안된 양방향 LMS 사전 왜곡기를 동일한 환경 하에서 여러 번 수행한 결과의 평균을 비교하였다.



<그림 6> 정상상태에서의 비선형 왜곡에 대한 선형화 결과  
 (a) 선형화 전의 진행과관의 입출력 특성  
 (b) 기존의 사전 왜곡기  
 (c) 제안된 사전 왜곡기

그림 4는 기존의 사전 왜곡기와 제안된 사전 왜곡기를 사용하여 비선형 왜곡을 감소시킨 결과를 시간 영역에서 표본 오차신호로 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 (b)의 제안된 적응 사전 왜곡기의 수렴 속도가 (a)의 기존의 적응 사전 왜곡기에 비해 약 5배 빠름을 알 수 있다.

그림 5는 기존의 적응 사전 왜곡기와 제안된 적응 사전 왜곡기의 계수 값의 궤적을 나타낸 것이다. 양쪽의 적응 사전 왜곡기에서는 모두 두 개의 항으로 이루어진 테일러 함수를 사용하였으므로 두 개의 계수에 대하여 나타내었다. 그림에서 (a)의 기존의 적응 사전 왜곡기의 1차 계수 값은 0.5075로 수렴해 가며, 3차 계수 값은 0.1018로 수렴해 감을 알 수 있다. 또한, 제안된 적응 사전 왜곡기의 1차 계수 값은 0.5040으로 수렴해 가며, 3차 계수 값은 0.0267로 수렴해 감을 알 수 있다. 양쪽의 적응 사전 왜곡기에서 1차 계수 값은 비슷하지만, 3차 계수 값에서 많은 차이가 있음을 알 수 있다. 수렴속도 측면에서 살펴보면 (a)의 기존의 적응 사전 왜곡기는 500표본 정도에서 정상상태에 도달하는 반면에 (b)의 제안된 적응 사전 왜곡

기는 100표본 정도에서 정상상태에 도달함을 알 수 있다. 즉, 제안된 적응 사전 왜곡기의 수렴속도가 기존의 적응 사전 왜곡기보다 약 5배 빠르다는 사실을 알 수 있다.

그림 6은 기존의 적응 사전 왜곡기와 제안된 적응 사전 왜곡기가 모두 정상상태에 도달하였을 때 비선형 왜곡을 선형화한 정도를 나타낸 것이다. 그림에서 (a) 곡선은 선형화하기 전의 비선형 왜곡 특성을 나타내며, (b) 곡선은 기존의 적응 사전 왜곡기를 사용하여 선형화한 결과를 나타내며, (c) 곡선은 제안된 적응 사전 왜곡기를 사용하여 선형화한 결과를 나타낸다. 정상상태에서의 결과이기 때문에 양쪽의 적응 사전 왜곡기를 사용한 결과가 유사하며, 그리 큰 차이를 보이지 않는다. 다만 기존의 사전 왜곡기와 제안된 사전 왜곡기가 모두 진행과관의 비선형 왜곡을 잘 선형화한 것으로 나타나며, 제안된 적응 사전 왜곡기가 기존의 적응 사전 왜곡기보다 매우 빠른 수렴속도로 정상상태에 도달한다는 사실을 확인할 수 있었다.

#### IV. 결론

본 논문에서는 무선 통신 시스템에서 일반적으로 많이 사용하는 고출력 증폭기의 비선형 왜곡을 보상하기 위해서 새로운 적응 사전 왜곡기를 제안하였다. 고출력 증폭기의 비선형 왜곡을 보상함으로써 송신 신호의 전력을 포화 영역 근처까지 확대하여 사용할 수 있다. 이는 송신 효율을 높이고 통신의 성능을 크게 향상시킬 수 있다. 수학적인 도출과 함께 컴퓨터 모의실험을 통해 기존의 적응 사전 왜곡기와 제안된 적응 사전 왜곡기가 모두 비선형 왜곡을 지닌 진행과관을 선형화하는데 적용할 수 있다는 것을 확인하였으며, 제안된 적응 사전 왜곡기가 거의 동일한 계산 양으로 기존의 적응 사전 왜곡기보다 비선형 왜곡을

보상하는데 빠른 수렴속도와 우수한 성능을 가지고 있다는 사실을 확인하였다. 끝으로 제안한 적응 사전 왜곡기는 진행과관 등 고출력 증폭기의 비선형 왜곡을 보상하는데 사용할 수 있을 뿐 아니라 다양한 비선형 소자나 비선형 시스템에서도 사용할 수 있는 등 그 응용 범위가 넓다고 할 수 있다.

## 참고문헌

- [1] Ali, M. T., Wu, R., Callaghan, P., and Rapajic, P, "Design of a highly linear high frequency amplifier using volterra model," Proceedings of IEEE 4th international symposium on microwave, antenna, propagation, and EMC technologies for wireless communications, 2011, pp. 355-358.
- [2] Kim, J., Woo, Y. Y., Moon, J., and Kim, B., "A new wideband adaptive digital predistortion technique employing feedback linearization," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 56, 2008, pp. 385-392.
- [3] A. N. D'Andrea, V. Lottici, and R. Reggiannini, "Efficient digital predistortion in radio realy links with nonlinear power amplifiers," IEE Proceedings Communication, vol. 147, no. 3, Jun. 2000, pp. 175-179.
- [4] He, L., Zhang, W., Xie, H., Jin, D., Wang, Y., Sha, Y., and Gao, P., "A new linearization technique of power amplifier," Proceedings of the international conference on microwave and millimeter wave technology, 2007, pp. 1-4.
- [5] D. R. Morgan, Z. Ma, J. Kim, M. G. Zierdt, and J. Pastalan, "A Generalized Memory Polynomial Model for Digital Predistortion of RF Power Amplifiers," IEEE Trans. Signal Processing, vol. 54, no. 10, Oct. 2006, pp. 3852-3860.
- [6] Bassam, Xiang, Liu, Rawat, Helaoui, Ghannouchi, Fen Chen, W., Bassam, S. A., Xiang, L., Liu, Y., Rawat, K., Helaoui, M., Fen, Z., "Design and linearization of concurrent dual-band doherty power amplifier with frequency-dependent power ranges," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 59, 2011, pp. 2537-2546.
- [7] K. J. Muhonen, M. Kavehrad, and R. Krishnamoorthy, "Look-up table techniques for adaptive digital predistortion: a development and comparison," IEEE Trans. Vehicular Technology, vol. 49, no. 5, Sep. 2000, pp. 1995-2002.
- [8] J. R. Pierce, Traveling Wave Tubes, Princeton, NJ:Van Nostrand, 1950.
- [9] Schetzen M, The Volterra and Wiener theories of nonlinear systems, New York: Wiley, 2006.
- [10] 권오상, "양방향 Filtered-x 최소 평균 제곱 알고리즘에 대한 실험적인 연구," 디지털산업정보학회 논문지, 제 10권, 제 3호, 2014.
- [11] 권오상, "양방향 Filtered-x 최소 평균 제곱 알고리즘에 대한 해석," 디지털산업정보학회논문지, 제 10권, 제 4호, 2014.
- [12] Simon Haykin, Adaptive Filter Theory, Prentice-Hall, Inc, 1991.

■ 저자소개 ■



권 오 상  
Kwon, Oh Sang

2005년 3월~현재  
고려사이버대학교 전기전자공학과  
교수  
1999년 2월 연세대학교 전자공학과(공학박사)  
1994년 2월 연세대학교 전자공학과(공학석사)  
1992년 2월 연세대학교 전자공학과(공학사)

관심분야 : 신호처리, 통신, 멀티미디어  
E-mail : narcis@cuk.edu

논문접수일: 2014년 9월 1일
수정일: 2014년 9월 20일(1차)
2014년 9월 25일(2차)
게재확정일: 2014년 10월 1일